

TC17 钛合金锻件异常组织特征及原因分析

韩 彤, 张俊晓, 刘 娣, 白 钰, 吴天栋, 张利军

(西安超晶科技股份有限公司 陕西省先进金属结构材料精确热成形重点实验室, 陕西 西安 710299)

摘 要: 经 $\alpha+\beta$ 两相区常规锻造的 TC17 钛合金锻件, 在低倍检查时发现部分区域有沿金属流动方向被压扁拉长且明暗交错的片层组织。采用金相显微镜观察到组织异常区域为变形魏氏组织, 与正常区域的等轴组织存在显著差异。经检测, 异常区域拉伸强度低于正常区域。通过实验手段结合生产实际分析, 排除了成分偏析、加热温度异常以及温度不均匀等影响因素。最终确定异常组织形成的原因为 TC17 钛合金锻造过程中, 局部区域因变形热效应产生了 36~44 °C 的温升, 锻造温度超过相变点而产生 β 锻造组织。

关键词: TC17 钛合金; 两相区; 过热组织; 变形热效应

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)03-035-05

Analysis of Features and Causes of Abnormal Structure in TC17 Titanium Alloy Forgings

Han Tong, Zhang Junxiao, Liu Di, Bai Yu, Wu Tiandong, Zhang Lijun

(Xi'an Chaojing Technology Co., Ltd., Shaanxi Key Laboratory of Advanced Metal Structural Materials Precision Thermoforming, Xi'an 710299, China)

Abstract: During macrostructure observation of a conventionally forged TC17 titanium alloy forging (processed in the $\alpha+\beta$ two-phase region), flattened and elongated lamellar structures with alternating light and dark bands along the metal flow direction were found in certain areas. Metallographic analysis showed that the abnormal area exhibited deformed Widmannstätten structure, which was significantly different from the equiaxed structure of the normal area. It was found that the tensile strength of the abnormal structure was lower than that of the normal structure. The experimental methods combined with practical production analysis were conducted to locate the causes of the abnormal structure formation. The factors such as component segregation, abnormal heating temperature and uneven heating temperature were excluded. The primary cause was attributed to a localized temperature increase of 36–44 °C in the abnormal regions during forging, which higher than the transformation temperature, resulting in the formation of β forging structure.

Keywords: TC17 titanium alloy; two-phase region; overheated structure; deformation heat effect

TC17 (名义成分为 Ti-5Al-2Sn-4Mo-4Cr-2Zr) 是一种富 β 稳定元素的 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金, 其综合性能优良, 广泛应用于航空航天领域, 特别是用作航空发动机叶片、压气机盘等部件^[1-2]。不同应用场景下 TC17 钛合金面临的服役环境差异较大, 对其性能要求也有所不同^[3]。通过不同温度下的热加工可对 TC17 钛合金组织进行调控 (如 $\alpha+\beta$ 两相区进行的常规锻造、近 β 锻造或在相变点以上单相区进行的 β 锻造), 进而获得与服役环境相匹配的性能^[4-7]。

为更好地平衡 TC17 钛合金锻件的强韧性, 两相区常规锻造成为 TC17 钛合金结构件生产过程中不可或缺的工作。国内研究人员从工艺、组织、性能等方面^[8-10]对 TC17 钛合金两相区锻造进行了详细研究, 建立了 TC17 钛合金热加工本构方程及热加工图^[11-15]。从 TC17 钛合金流变应力曲线可以看出, 其变形抗力大, 对变形温度和应变速率敏感, 两相区成形较困难^[11-12]。从热加工图以及相应失稳区域显微组织可知, 其热加工工艺窗口较窄, 变形温度接近相变点且应变速率较大时易发生绝热温升效应, 导致加工过程温度超过相变点, 组织中出现类似 β 锻造组织^[12-13]。

收稿日期: 2024-12-23

通信作者: 韩彤 (1993—), 女, 工程师。

尽管研究人员针对 TC17 钛合金两相区热加工工艺开展了大量研究,但在其生产以及使用过程中仍出现了较多问题^[16-19]。郭峰等人^[16]研究发现,TC17 钛合金叶片发生高周疲劳断裂是由于其组织状态不良,叶片多部位出现条带状 α 相,个别部位甚至出现大块 α 相,使得材料的断裂韧性偏低。赵兴东等人^[17]通过显微组织观察、成分分析等手段分析了 TC17 钛合金在两相区锻造过程中形成亮条的原因。研究发现,合金亮条区域 Cr 元素含量比基体高 1%,即 Cr 元素微区偏析是形成亮条的主要原因。岳旭等人^[18]也证实 Cr 元素微区分布不均匀是 TC17 钛合金产生亮斑的原因,锻造温度距相变点温度较近则是诱发因素。

从上述文献可以看出,TC17 钛合金锻件生产过程中产生的问题多集中在组织均匀性方面,因此对其异常组织进行分析十分必要。本研究使用的 TC17 钛合金锻件在加工过程中出现了组织异常,为避免类似问题再次发生,采用实验方法并结合实际生产情况,对异常组织进行表征,同时分析异常组织产生的原因,以期后续改善 TC17 钛合金锻件两相区加工工艺提供借鉴。

1 实验

1.1 实验材料

实验原材料为经三次真空自耗电弧熔炼的 TC17 钛合金铸锭,金相法测得其 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相转变温度为 880~885 °C。铸锭经多火次镦拔锻造,最终锻造成 130 mm×300 mm×800 mm 的锻件,其中成品锻造加热温度为 855 °C,即相变点以下 25~30 °C 两相区锻造,成品锻造道次变形量在 16%~33% 之间。对 TC17 钛合金锻件进行分料以及热处理,热处理制度为: 810 °C/120 min/WC + 620 °C/480 min/AC。

将 TC17 钛合金锻件端面车光,进行低倍组织观察,发现低倍组织存在异常情况,正常组织和异常组织低倍照片见图 1。从图 1a 可以看出,正常组织为模糊晶。从图 1b 可以看出,异常组织与正常组织存在较大区别,组织整体沿锻造时金属流动方向被拉长,宏观上呈现为明暗交错的片层状组织。

1.2 实验方法

从低倍组织正常和异常的锻件上分别切取 $\phi 12$ mm×20 mm 金相试样、 $\phi 12$ mm×80 mm 拉伸试样。金相试样经磨光、抛光、腐蚀、吹干后,使用 ICX41M 金相显微镜进行显微组织观察,并使用 TESCAN CLARA 场发射扫描电镜 (SEM) 附带的能谱仪 (EDS) 进行面扫描分析。拉伸试验按照 GB/T 228.1—2021 标准要求,采用 UTM 5105 SYXL 电子万

能拉力试验机进行室温拉伸性能测试。从拉伸试样上取成分试样,采用 Prodigy 型 ICP 电感耦合等离子体光谱仪检测 Al、Mo、Zr、Sn、Cr 元素含量,采用 TC600 氧氮分析仪检测 O 元素含量。

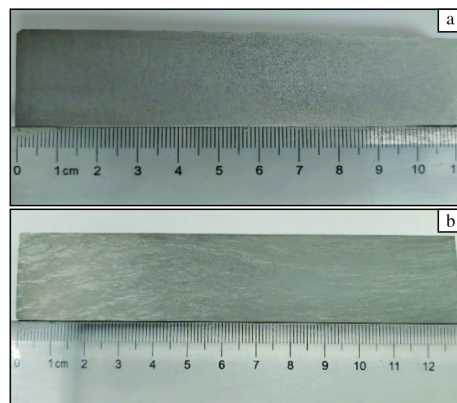


图 1 TC17 钛合金锻件低倍组织照片

Fig.1 Macrographs of TC17 titanium alloy forging:
(a) normal area; (b) abnormal area

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

图 2 为 TC17 钛合金经 $\alpha+\beta$ 两相区锻造后正常区域的显微组织。从图 2 可以看出,正常区域显微组织为典型的等轴组织,初生 α 相呈球状、橄榄球状均匀分布在 β 相转变基体中,次生 α 相呈细小的长条状分布在残余 β 基体相中。

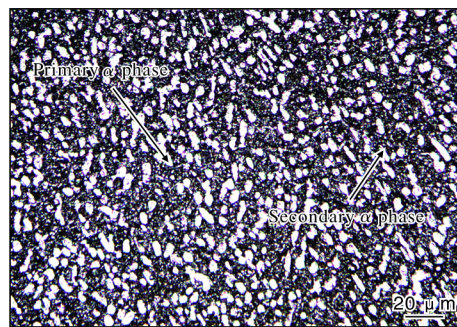


图 2 TC17 钛合金锻件正常区域显微组织

Fig.2 Normal area microstructure of TC17 titanium alloy forging

图 3 为 TC17 钛合金经 $\alpha+\beta$ 两相区锻造后异常区域的显微组织。从图 3a 可以看到,原始 β 晶界清晰且晶粒未充分破碎,尺寸较大。从图 3b 可以看到,在相邻原始 β 晶粒内部,由于 α 束取向差异大,导致相邻原始 β 晶粒颜色不同,在低倍观察时呈现出明暗交错的片层状组织,并且原始 β 晶界 α 相平直且连续。组织异常区域为变形的魏氏组织。

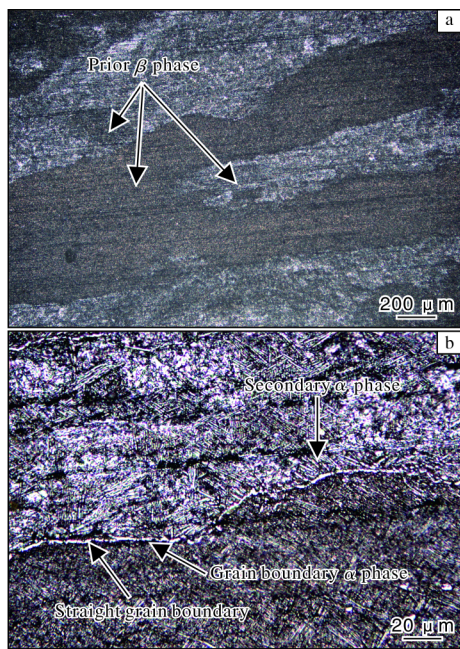


图3 TC17 钛合金锻件异常区域显微组织

Fig.3 Abnormal area microstructures of TC17 titanium alloy forging: (a) 50×; (b) 500×

2.2 室温拉伸性能分析

表1为TC17钛合金锻件不同组织区域的室温拉伸性能。从表1可以看出,异常组织区域平均抗拉强度(1036 MPa)比正常区域(1196 MPa)低160 MPa,屈服强度(979 MPa)比正常区域(1158 MPa)低179 MPa。这说明异常组织会导致TC17钛合金锻件的拉伸强度降低,因此需要对异常组织形成原因进行分析,以便采取措施,避免问题再次发生。

表1 TC17 钛合金锻件不同区域室温拉伸性能

Table 1 Room-temperature tensile properties in different areas of TC17 titanium alloy forging

Sampling location	No.	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Normal area	1	1198	1159	11.5	44.0
	2	1194	1157	10.5	40.0
	Avg	1196	1158	11.0	42.0
Abnormal area	1	1025	965	14.5	51.0
	2	1047	993	10.0	28.0
	Avg	1036	979	12.25	39.5

2.3 异常原因分析

通过对TC17钛合金异常区域显微组织的分析,可以看出锻件在两相区锻造过程中出现了魏氏组织。根据相关文献^[17-21],导致钛合金两相区锻造过程中形成魏氏组织的原因主要有:①钛合金中含有易偏析元素(Mo、Cr等),如果铸锭成分不均匀,某些

区域存在 β 稳定元素偏析情况,该区域相较正常区域相变点偏低,当锻造或热处理过程温度接近相变点时,就会出现 β 斑^[17-18];②生产过程中加热温度不均匀或锻造过程中发生温升,该区域温度接近甚至超过钛合金相变点,进而产生过热组织^[19-21]。

基于上述分析,从材料成分、加热温度均匀性以及锻造过程温升程度等方面对TC17钛合金锻件组织异常的原因进行分析。

2.3.1 化学成分分析

对TC17钛合金锻件组织正常区域和异常区域的化学成分进行分析,结果见表2。从表2可以看出,异常区域化学成分与正常区域无明显差异,未发现 β 稳定元素偏析情况,故排除铸锭宏观成分偏析引起的组织异常。

表2 TC17 钛合金锻件不同区域化学成分(w%)

Table 2 Chemical composition in different areas of TC17 titanium alloy forging

Area	Al	Mo	Zr	Sn	Cr	O
Normal area	5.15	4.07	1.97	2.10	3.88	0.125
Abnormal area	5.10	3.94	2.11	2.10	4.00	0.124

2.3.2 能谱分析

对TC17钛合金不同组织区域进行能谱面扫描分析,结果见图4。通过对比组织异常区域和正常区域

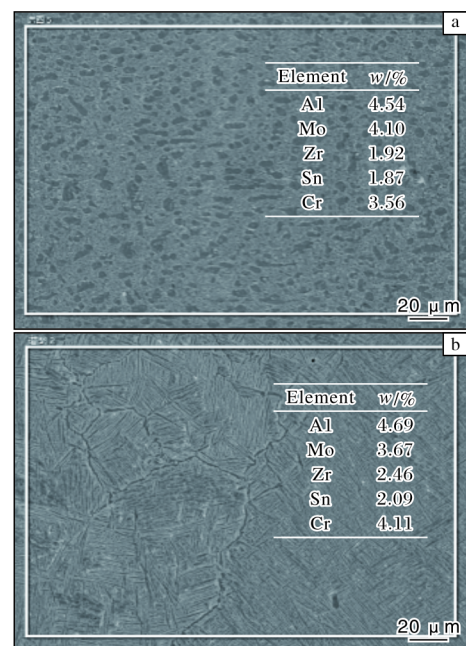


图4 TC17 钛合金锻件不同区域SEM像和能谱面扫描分析结果

Fig.4 SEM morphologies and EDS surface scanning analysis results in different areas of TC17 titanium alloy forging: (a) normal area; (b) abnormal area

各元素含量,发现 Cr 元素的差异最大。异常组织中 Cr 元素含量比正常区域高 0.55%,但仍未达到与相关研究^[17-18]所描述的“Cr 元素偏差 $\geq 1.0\%$ ”的水平。通过计算法得到的正常区域相变点为 911.8 °C,与异常区域相变点(908.7 °C)差别不大,进一步排除因成分不均匀引起的组织异常。

2.3.3 温度均匀性分析

表 3 为 TC17 钛合金锻件成品锻造和热处理的过程

程数据统计,图 5 为 TC17 钛合金锻件热处理装炉照片。从表 3 和图 5 可以看出,坯料尺寸小于有效加热区尺寸,且加热过程中严格遵循“锻件不叠放,不直接接触加热电阻丝”的工艺要求。从炉温均匀性实际差值以及锻件加热温度可以看出,加热炉/热处理炉温度均匀性满足技术要求,且 TC17 钛合金锻件成品锻造加热与热处理温度也符合工艺要求,排除因实际加热温度过高或加热温度不均匀引起的组织异常。

表 3 TC17 钛合金成品锻造及热处理的过程数据统计

Table 3 Statistical data for finished product forging and heat treatment process of TC17 titanium alloy

Process	Finished forging	Heat treatment	
		First annealing	Second annealing
Effective heating zone/mm	1800×1200×900	2200×2500×1000	2500×1800×600
Blank size/mm	$\phi 300 \times 455$	130×300×400	130×300×400
Temperature uniformity of furnace/°C	± 10	± 10	± 5
Actual temperature difference/°C	-4.6~6.8	-6.7~6.0	-3.3~2.3
Actual heating temperature/°C	854.1~855.4	808.1~810.1	618.1~621.0

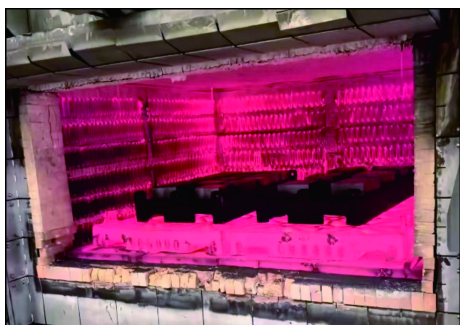


图 5 TC17 钛合金锻件热处理装炉照片

Fig.5 Photo of heat treatment charging of TC17 titanium alloy forging

2.3.4 锻造温升分析

钛合金在塑性变形过程中,产生的塑性变形功会转化为热能,使合金温度升高,引发变形热效应^[22]。自由锻造过程中,由于坯料各部分变形不均匀,产生不均匀的变形热,可能导致组织出现较大差异^[21]。这种温度上升现象受变形温度、变形量与应变速率的影响,通常可采用式(1)计算温升 ΔT ^[23]:

$$\Delta T = 0.95\eta / (\rho C_p) \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

式中: η 为热压缩过程的绝热因子(变形速率为 0.21 s^{-1} 时 η 为 0.74,变形速率为 0.44 s^{-1} 时 η 为 0.84); ρ 为材料密度, 4.58 g/cm^3 ; C_p 为材料的定压比热容, $0.608 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ^[24]; σ 为流变应力,MPa; ε 为真应变。

TC17 钛合金锻件的成品锻造加热温度为 855 °C,道次锻造变形量为 17%~33% (真应变为 0.19~0.40),根据锻机道次压下量以及锻造频次计算得到 TC17 钛合金锻件锻造应变速率约为 $0.21 \sim 0.44 \text{ s}^{-1}$ 。使用杨晓康等人^[9]建立的应变补偿双曲正弦本构模型,经计算得到 TC17 钛合金在锻造温度 855 °C、真应变 0.19~0.40、应变速率 $0.21 \sim 0.44 \text{ s}^{-1}$ 条件下的应力为 141~152 MPa,再通过式(1)计算变形热效应产生的温升 ΔT 为 36~44 °C。由此可见,存在因区域锻造温度超出相变点而造成微观组织转化为魏氏组织的情况。

考虑到变形热效应引起温升的大小受变形温度、变形量和应变速率的影响,应通过降低成品锻造加热温度,同时减小变形量和应变速率来避免产生魏氏组织。

后期生产 TC17 钛合金锻件时,将成品锻造加热温度调整为相变点以下 45~50 °C,道次变形量调整为 22%~27%,控制压下量 $< 50 \text{ mm/次}$ (应变速率 $< 0.31 \text{ s}^{-1}$)。图 6 为采用改进工艺制备的 TC17 钛合金锻件热处理后的低倍组织照片。从图 6 未发现组织异常



图 6 工艺改进后 TC17 钛合金锻件低倍组织照片

Fig.6 Macrograph of TC17 titanium alloy forging after process improvement

现象,说明可以通过降低成品锻造加热温度、减小道次变形量和应变速率消除锻造温升引起的异常组织。

3 结 论

(1) TC17 钛合金锻件低倍组织异常区域为魏氏组织,与正常区域的等轴组织差异较大,且室温拉伸强度远低于正常区域。

(2) TC17 钛合金锻件低倍组织异常的原因是成品锻造加热温度(相变点以下 25~30 °C)接近相变点,且锻造变形量较大(17%~33%),锻造过程中因变形热效应产生较大温升(36~44 °C),导致实际锻造温度大于相变点,造成锻件组织不均匀。

(3) 由锻造温升引起的 TC17 钛合金锻件组织异常,可以通过适当降低成品锻造加热温度、减小道次锻造变形量以及应变速率来改善。

参考文献 References

- [1] Ren L N, Zhang Q B, Lei X W, et al. Effect of laser heat input on microstructure and fatigue behavior of TC17 titanium alloy laser welded joint[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(7): 1836-1844.
- [2] 周昊,王耀奇,李红,等. 氢 TC17 钛合金组织演变规律及高温变形行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(3): 947-952.
- [3] 魏鑫,李昌永,赵兴东,等. TC17 钛合金盘锻件的工艺优化及组织性能分析[J]. *中国材料进展*, 2023, 42(11): 918-923.
- [4] 邓雨亭,李四清,王旭. 航空发动机用大规格 TC17 钛合金棒材显微组织均匀性研究[J]. *钛工业进展*, 2021, 38(5): 10-13.
- [5] 田伟,伏宇,钟燕,等. 锻造工艺对 TC17 钛合金的显微组织和力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(9): 57-61.
- [6] 胡轶嵩,王凯旋,姜葳,等. β 锻造工艺对 TC17 钛合金锻件组织和力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(9): 41-44.
- [7] 张赛飞. TC17 钛合金三种典型组织的疲劳与断裂性能研究[D]. 西安:西北工业大学,2017.
- [8] 王凯旋,冯贞伟,丁永峰,等. TC17 钛合金超大规格棒材的制备[J]. *钛工业进展*, 2014, 31(5): 32-35.
- [9] 杨晓康. 小规格 TC17 钛合金棒材热成形模拟及加工研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
- [10] 郭萍,强菲,王欢,等. 热处理工艺对大规格 TC17 钛合金棒材组织与力学性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2024, 41(3): 19-23.
- [11] 温飞娟,温奇飞,龙樟,等. TC17 钛合金热变形行为及本构模型[J]. *机械工程材料*, 2023, 47(8): 86-92.
- [12] 杨晓康,王快社,史佳敏,等. TC17 钛合金高温变形行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(9): 2895-2900.
- [13] 周军,曾卫东,舒滢,等. 应用热加工图研究 TC17 合金片状组织球化规律[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35(2): 265-269.
- [14] 周建华,王晓英,徐斌,等. TC17 钛合金热变形过程中片状组织演变规律[J]. *钛工业进展*, 2012, 29(5): 15-18.
- [15] 刘继雄,岳旭,杨军,等. TC17 钛合金两相区变形时的失稳行为及组织特征[J]. *机械工程材料*, 2015, 39(12): 71-74+79.
- [16] 郭峰,刘德林,梁伟,等. TC17 钛合金叶盘破裂分析[J]. *失效分析与预防*, 2015, 10(1): 62-66.
- [17] 赵兴东,陈仲强,郑渠英,等. TC17 钛合金整体叶盘腐蚀表面“亮条”的成因及其对性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2011, 28(4): 28-31.
- [18] 岳旭,黄德超,宋蕊池,等. TC17 钛合金棒材低倍组织亮斑研究[C]//中国有色金属工业协会钛锆钨分会 2012 年钛年会论文集. 北京:中国有色金属工业协会,2012.
- [19] 孙继锋,黄爱军,闵新华,等. TC18 锻棒钛合金低倍显微组织大面积缺陷分析[J]. *热处理*, 2016, 31(1): 49-52.
- [20] 莫畏,马济民,贺金宇,等. 钛铸锭和锻造[M]. 北京:冶金工业出版社,2012: 169.
- [21] 王晓亮,张晓园,史小云,等. 锻造温升对 TC21 合金微观组织和拉伸性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(23): 119-121+124.
- [22] 钟明君,王克鲁,鲁世强,等. TC20 钛合金的变形热效应和局部流动行为[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020(10): 1156-1160.
- [23] 王磊. TC18 钛合金热变形行为研究[D]. 青海:青海大学,2023: 46.
- [24] 王莉敏,李京龙,熊江涛,等. 异种钛合金连续驱动摩擦焊稳态阶段粘塑性区平均温度的解析计算[J]. *材料研究学报*, 2013, 27(5): 501-507.